

⟨bra| und |ket⟩ und Schrödingers Katze
Teil 2: Interpretationen der Quantenphysik
von Seejay

Im Teil 1 habe ich euch vom Kollaps der Zustandsfunktion erzählt, bei dem ein Messprozess das beobachtete Quantenobjekt (z.B. Photon) in einen Eigenzustand des Messgerätes wirft, während es vorher eine Zusammensetzung mehrerer Zustände gewesen sein kann. In *welchen* Zustand es dabei fällt, ist allerdings nicht vorhersagbar, berechnen kann man nur die Wahrscheinlichkeit. Für den Kollaps gibt es innerhalb der Quantenphysik keinen Mechanismus, um ihn zu erklären. In dieser Folge gebe ich euch einen Überblick von Interpretationen, die vorgeschlagen wurden, um dieses Problem in den Griff zu bekommen.

Die orthodoxe Interpretation

Diese geht auf Max Born, Werner Heisenberg und vor allem auf Niels Bohr zurück. Bohr wirkte in Kopenhagen, daher der Name „Kopenhagener Interpretation“. Diese Denkrichtung ist dadurch gekennzeichnet, dass sie Fragen nach den Hintergründen vermeidet und in den Bereich der Metaphysik verbannt, stattdessen verweist sie auf den offensichtlichen praktischen Erfolg der Quantenphysik: „Halt’s Maul und rechne!“.

Murray Gell-Mann sagte später dazu: „Eine philosophische Aufarbeitung wurde fünfzig Jahre lang dadurch verzögert, dass es Bohr gelungen war, eine ganze Generation davon zu überzeugen, das Problem sei bereits gelöst.“

Bohrs Denkweise stand ganz im Stil der damals vorherrschenden Denkrichtung des „Positivismus“ und „Antirealismus“, die es ablehnte, eine über die Beobachtung hinausgehende Realität anzunehmen. Alle Physik ist danach nur Beschreibung von Beobachtungen. Bohr führte den Begriff der „Komplementarität“ ein und meinte damit, dass sich Quantenobjekte unter gewissen Umständen (z.B. bei der Polarisierung) als Wellen beschreiben lassen, unter anderen (z.B. Auftreffen auf eine Fotoplatte) als Teilchen. Wir sollen aber akzeptieren, dass diese Aspekte miteinander unvereinbar sind.

Anhänger des „dialektischen Materialismus“ sahen in der Komplementarität keine Unvereinbarkeit, sondern im Gegenteil einen Ausdruck des dialektischen Prinzips in der Welt, wonach die innere Widersprüchlichkeit eine reale Eigenschaft der Materie und keine logische Kontradiktion ist.

Hans Reichenbach betrachtet die Komplementarität als eine Singularität, die durch die spezielle Beschreibungsweise der Natur künstlich erzeugt wird. Naturgesetze und Zustände sind für ihn prinzipiell von einer Beobachtung unabhängig. Er unterscheidet „Phänomene“ (die man beobachten kann) und „Interphänomene“ (die sich unbeobachtet dazwischen abspielen). In der „Dualitätsinterpretation“ gibt es zwar für jedes Interphänomen einen Beschreibungsrahmen (Welle oder Teilchen), bei Reichenbach als Normalsystem bezeichnet, jedoch keinen für alle gemeinsam. In der „einschränkenden Interpretation“ wird – positivistisch – auf die Beschreibung der Interphänomene völlig verzichtet. Wenn eine Welle beobachtet wird, *gibt es* kein Teilchen und umgekehrt, denn was nicht beobachtet wird, *existiert nicht*. Eine Haltung, die man ja auch (wenngleich zu Unrecht) dem Vogel Strauß zuschreibt.

Unklar bleibt auch, was die Zustandfunktion eigentlich *ist*. Kommt ihr überhaupt eine ontologische Realität zu? Es könnte ja auch sein, das ein Lichtquant, das oben auf die Fotoplatte trifft, von Anfang an dieses Ziel hatte. Dass der Zustand vorher als

$$|v\rangle = 0,8 \cdot |w\rangle + 0,6 \cdot |s\rangle$$

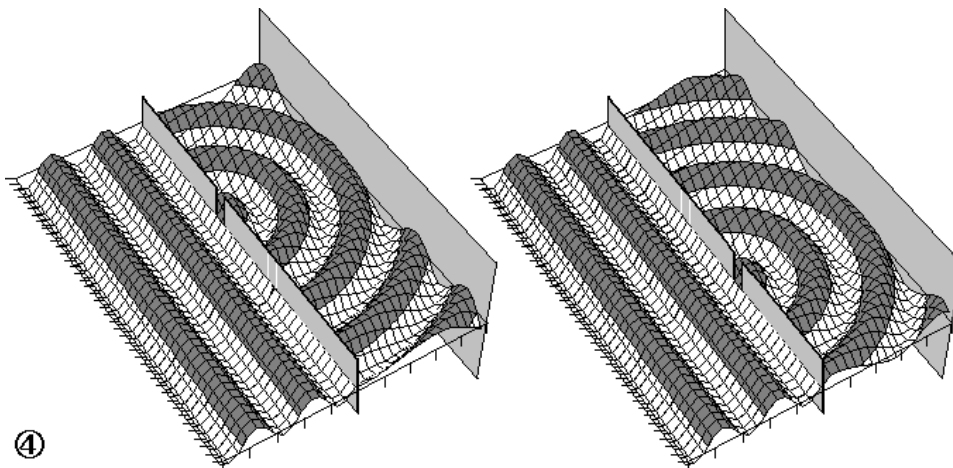
zu beschreiben war, bedeutet dann lediglich eine Unsicherheit in der Kenntnis des Beobachters. Durch die Messung wird seine Kenntnis vergrößert, also weiß er dann, ob es der

Zustand $|w\rangle$ oder $|s\rangle$ war. Die Messung ändert dabei nichts am Lichtquant, sondern nur am *Wissen des Beobachters*. Das Problem des Kollapses entstünde dann nur dadurch, dass man der Zustandsfunktion eine Realität zuschreibt.

Leugnet man aber deren Realität, so bekommt man Schwierigkeiten. Schräg polarisiertes Licht $|v\rangle$ wäre dann gar nicht schräg polarisiert, sondern bestünde aus einer Mischung senkrecht und waagrecht polarisierter Photonen $|s\rangle$ und $|w\rangle$. Auch Interferenzversuche wie den mit dem Doppelspalt könnte man dann nicht mehr erklären. Der Doppelspalt ist hier allerdings keine besonders starke Kopfschmerztablette – obwohl Erwin Schrödinger sie gut hätte brauchen können, nachdem er die Konsequenzen seiner Gleichung begriffen hatte und nach eigenem Bekunden bedauerte, sich jemals damit befasst zu haben.

Interferenzen

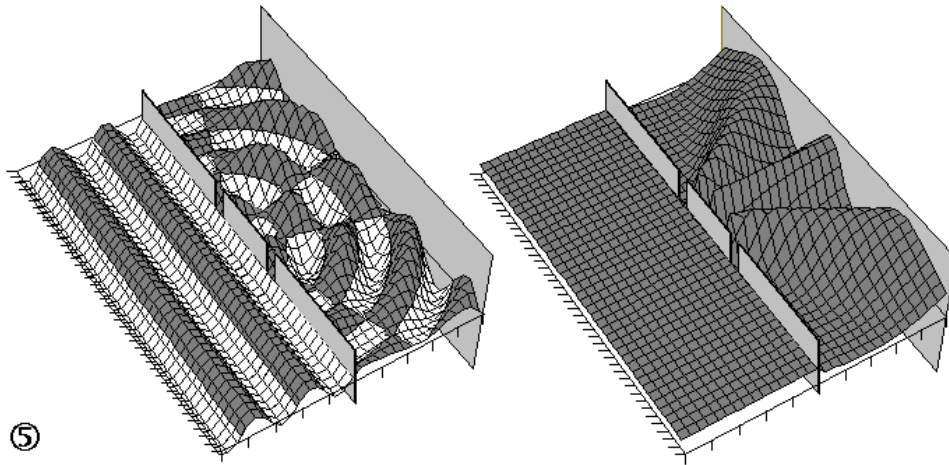
Interferenz kennt ihr alle, sie ist verantwortlich für die Farben von Schmetterlingsflügeln oder die bunten Schlieren auf einer Seifenblase. Interferenz entsteht, wenn sich Wellen überlagern. Wo Wellenberge oder Wellentäler aufeinandertreffen, verstärken sie sich, trifft ein Berg auf ein Tal, so schwächen sie sich und addieren sie sich im Extremfall zu Null. Der klassische Interferenzversuch ist das Doppelspalt-Experiment. Das kann man mit Glück in der freien Wildbahn beobachten, wenn schöne gerade Wellenfronten auf eine Hafenmole treffen, die irgendwo Lücken hat, oder man kann es mit Wasser in einer flachen Schale und einem passend gebastelten Hindernis ausprobieren.



In Bild 4 habe ich das mal versucht darzustellen. Im linken Bild hat die Mole nur eine Lücke, d.h. es ist nur ein Spalt (der linke) geöffnet. Ebene Wellen branden von links dagegen. Wo sie durch die Öffnung gehen, breiten sich dahinter ringförmige Wellen aus. Im rechten Bild ist nur der rechte Spalt auf. Wenig überraschend breiten sich die Wellenringe nun von dort aus. Im Bild 5 links haben wir die Anordnung des Doppelspalt-Versuches. Jetzt addieren sich die Ringwellen von beiden Spalten zu einem Muster, in dem es Orte hoher Wellen (genannt „Wellenbäuche“) gibt und dazwischen Bereiche, in den sich das Wasser gar nicht bewegt, so genannte „Knotenlinien“. (Dass die Wellen eigentlich von der Kaimauer zurückschwappen, habe ich ausgeblendet, weil es die Sache nur verkompliziert.)

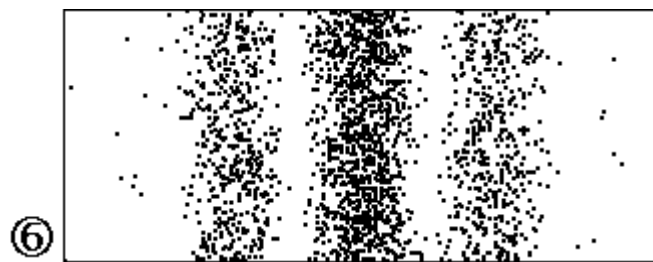
Thomas Young führte 1802 erstmals einen entsprechenden Versuch mit Licht durch und erkannte so den Wellencharakter von Licht. Auf einem Schirm anstelle der Kaimauer erscheinen dabei beleuchtete Stellen bei den Bäuchen und unbeleuchtete Stellen bei den Knoten. Die dunklen Stellen (Minima) sind permanent dunkel, und die hellen Stellen (Maxima) permanent hell. Lasst euch nicht davon irritieren, dass die Wellen scheinbar auf und ab schwappen, es wird nicht abwechselnd hell und wieder dunkel. Die Ψ -Funktion ist komplex, also zweidimensional. Da aber schon das „Spielfeld“ zweidimensional ist, bräuchte man zur korrekten Darstellung vier Dimensionen. Was da im Bild „wellt“, ist nur der Realteil

von Ψ , den Imaginärteil bringe ich in der Abbildung nicht mehr unter. Ψ ist ein rotierender Pfeil und wird nicht Null, nur weil der Realteil Null wird. An diesen Stellen ist der Imaginärteil sogar gerade maximal (guckt euch noch einmal Bild 1 an).



Deshalb habe ich in Bild 5 rechts das Betragsquadrat von Ψ darstellt. In den Knoten ist das resultierende Ψ tatsächlich Null, weil die Pfeile der beiden Teilwellen in entgegengesetzte Richtungen zeigen und sich zu Null addieren. Jetzt sollten die Maxima und die Knotenlinien (Minima) hinter dem Doppelspalt klar zu erkennen sein.

Und schon taucht wieder das zentrale Problem der Quantenphysik auf: Jedes Lichtquant trifft an genau einer Stelle auf den Schirm oder die Fotoplatte. An den Maxima schlagen viele Lichtquanten ein, an den Minima gar keine. Auf ein einzelnes Quant bezogen, ist $|\Psi|^2$ an jeder Stelle die Wahrscheinlichkeit, dass es hier auftrifft. Aber unvorhersagbar trifft es *irgendwo* auf und hinterlässt einen schwarzen Punkt auf der Platte (Bild 6). Wunderbarerweise bilden die einzelnen Punkte dann in ihrer Gesamtheit das Interferenzmuster, als hätten die Lichtquanten es gewusst. (Da Licht im Gegensatz zu Wasserwellen den ganzen Raum erfüllt, erstreckt sich das Muster auch nach oben und unten – es sei denn, man nimmt einen Laser).



Und weg ist die Welle. Kollabiert. Und dennoch braucht man sie, um das Interferenzmuster zu berechnen. Wenn Ψ sich nur auf unser *Wissen* vom Lichtquant bezöge, so wäre jedes Quant unabhängig von einer Beobachtung durch genau einen der beiden Spalte gegangen. Dann könnte es aber nicht wissen, ob der andere Spalt gerade offen oder geschlossen war und ob es daher auf der Platte zu einem Interferenzmuster beizutragen hat oder nicht.

Der Messprozess

Hierunter versteht man die Bestimmung einer Eigenschaft eines Quantenobjektes. Ob dazu ein Experimentator oder eine Experimentatorin erforderlich ist (ich liebe diesen Zungenbrecher; im weiteren Verlauf werde ich aber darauf verzichten, weil die Redaktion von mir erwartet, dass ich mich kurz fasse), oder ob der Prozess auch ohne dessen oder deren Beteiligung ablaufen kann, bleibt vorerst durchaus strittig.

Dabei herrscht die selten explizit ausgesprochene Vorstellung, dass Makro-Objekte wie Messgeräte mit klassischer Physik zu beschreiben sind, Quantengesetze für sie also nicht

gelten. Das scheint unumgänglich, da ein Quantensystem ja nicht messen *kann*. Es stellt immer einen Überlagerungszustand aus (beispielsweise) einem Lichtquant oben und einem Lichtquant unten dar. Es gibt keinen Prozess innerhalb der Theorie, der daran etwas ändert. Andererseits ist das Ergebnis einer Messung eine eindeutige Aussage wie „Schwärzung oben“ bzw. „Schwärzung unten“. Irgendwo zwischen Quantensystem und Messergebnis liegt eine mysteriöse Grenze, die man auch den „Heisenberg-Schnitt“ nennt.

Vor dem Schnitt stellen die Quanten (Elektronen, ...) einen so genannten „reinen Zustand“ dar, d.h. sie können ein Interferenzmuster erzeugen. Dahinter sind sie zu einzelnen Messpunkten (wie in Bild 6) geworden, die das nicht mehr können, das nennt man auch einen „gemischten Zustand“, gemischt aus vielen Quanten mit jeweils konkretem Ort.

Es gibt Versuche, die Quantentheorie „vorsichtig“ zu erweitern, um den Kollaps der Wellenfunktion mit zu erfassen. „Vorsichtig“ heißt, es sind Korrekturterme an der Schrödinger-Gleichung anzubringen, die den sonstigen Erfolg der Quantenphysik nicht gefährden. Die Wahrscheinlichkeiten für Messergebnisse dürfen sich nicht ändern, die Messung einer Eigenschaft muss zwar einen eindeutigen Messwert ergeben, aber bezüglich einer anderen Eigenschaft, die noch nicht gemessen wurde, muss das Objekt wieder ein Überlagerungszustand sein. Beim Versuch mit dem Kalkspat muss z.B. für ein auf den Zustand „oben“ kollabiertes Lichtquant für einen nachfolgenden zweiten Kalkspat, der um 45° gedreht ist, wieder völlig unbestimmt sein, wohin es abgelenkt wird.

Gian Carlo Ghirardi, Alberto Rimini und Tullio Webber schlugen eine Korrektur vor, die zur Anzahl der beteiligten Atome proportional ist, sodass bei mikroskopischen Systemen kein Einfluss zu bemerken ist. Erst bei makroskopischen Systemen (wie Messgeräten) macht sich die Korrektur bemerkbar. Ein einzelnes Objekt springt dabei mit einer unbeobachtbar kleinen Wahrscheinlichkeit in einen definierten Zustand, aber bei vielen Atomen ist der Kollaps dann nicht mehr zu vermeiden. Nichtsdestoweniger muss der Kollaps zufallsbestimmt sein, weil sonst nur immer wieder der gleiche Messwert herauskäme. Allerdings kommt jetzt dieses Zufallselement wiederum von außerhalb der Theorie, sodass im Grunde nichts gewonnen ist.

Verborgene Parameter

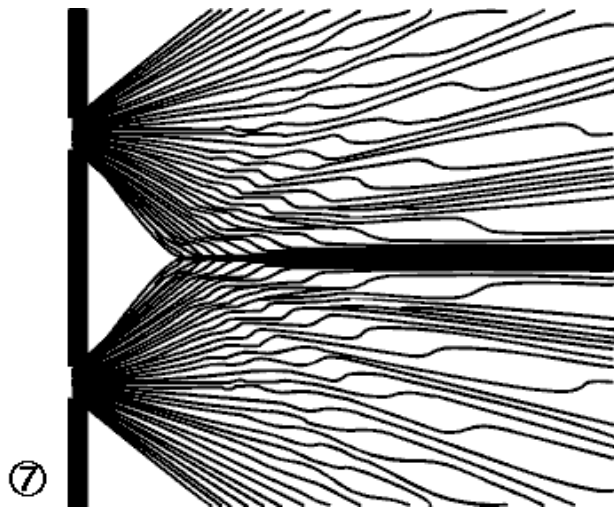
Die Auffassung eines reinen Zustandes als Überlagerung der möglichen Eigenzustände – und damit der Verzicht auf von der Beobachtung unabhängig existierende Teilchenbahnen – wurde ja erforderlich, weil im Falle realer Teilchenbahnen im Rahmen der bekannten Naturkräfte keine Erklärung der Interferenz mehr möglich war. Die Naturkräfte sind „lokal“ in dem Sinne, dass eine Wirkung sich von der Ursache höchstens mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten kann. Eine gegebene Ursache kann nicht *gleichzeitig* an einem anderen Ort eine Wirkung hervorbringen. Insbesondere kann beim Doppelspaltversuch ein offener oder geschlossener Spalt A nicht ein Lichtquant in seiner Bahn beeinflussen, das gerade durch Spalt B geht. Die Deutung von $|\Psi|^2$ als Maß für unser *Wissen* vom Aufenthaltsort des Lichtquants scheidet damit aus, sondern es *ist* die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Objektes.

Die Theorie der verborgenen Parameter von David Bohm und Louis de Broglie kommt hingegen genau auf diese Auffassung vom unvollständigen Wissen zurück. Bohm und de Broglie separieren die Schrödinger-Gleichung in den Realteil und den Imaginärteil. Im Realteil lässt sich $T + V$ in einen klassischen und einen quantenphysischen Anteil aufspalten:

$$\frac{1}{2} mv^2 + V + U.$$

Nur U enthält noch die Planck-Konstante h, der Rest ist die klassische kinetische und potentielle Energie. Damit beschreibt die Gleichung ein klassisches Teilchen im Kraftfeld V, dem eine zusätzliche „Quantenkraft“ U hinzugefügt wird, deren Verlauf wiederum durch das Betragsquadrat der Zustandfunktion $|\Psi|^2$ bestimmt wird. Komplexe Zahlen treten nicht mehr

auf. In diesem Modell laufen die Teilchen wieder auf wohldefinierten Bahnen. Beim Doppelspalt-Versuch geht jedes Teilchen nur durch einen der Spalte und wird durch die Quantenkraft so geführt, dass auf der Fotoplatte trotzdem ein Interferenzmuster entsteht (Bild 7, Quelle: Wikipedia, public domain).



Der „verborgene Parameter“ ist hier der Ort, an dem ein Teilchen den Spalt passiert. Obwohl die Teilchen nun wieder auf wohldefinierten Bahnen verlaufen, kann man nicht vorhersagen, wo ein konkretes Teilchen auf die Fotoplatte trifft, da man die Anfangsposition innerhalb des Spaltes nicht kennt. Wie man in Bild 7 sieht, hängt der Weg des Teilchens aber hiervon ab. Die weiterhin einzig möglichen Wahrscheinlichkeitsaussagen beruhen somit auf ungenügender Kenntnis der Anfangsbedingungen.

Eine Reihe von Einwänden, die gegen diese Theorie ins Feld geführt wurden, machen sie allerdings unpopulär: In der Formel für die Quantenkraft tritt $|\Psi|^2$ im Nenner auf, also ist diese Kraft an irgendwelchen entlegenen Orten, an denen Ψ praktisch Null ist, gerade besonders groß. Zudem ist die Quantenkraft, da sie durch den Verlauf von Ψ bestimmt wird, *nichtlokal*. Öffnen oder Schließen eines Spaltes ändert schlagartig das Kraftfeld beim anderen Spalt.

Spoiler: Die Nichtlokalität wird allerdings nicht nur durch dieses spezielle Modell erzeugt, sondern sie ist eine generelle Eigenschaft der Welt, wie sich noch zeigen wird.

John von Neumann stellte 1932 ein Theorem auf, welches das Aus für verborgene Parameter zu bedeuten schien. Dem Theorem zufolge führen verborgene Parameter notwendigerweise zu einem Widerspruch. Unter der Annahme verborgener Parameter stellte sich nämlich heraus, dass bei der Messung zweier Observabler A und B der Erwartungswert der Summe $\langle A + B \rangle$ nicht gleich der Summe der Erwartungswerte $\langle A \rangle + \langle B \rangle$ ist.

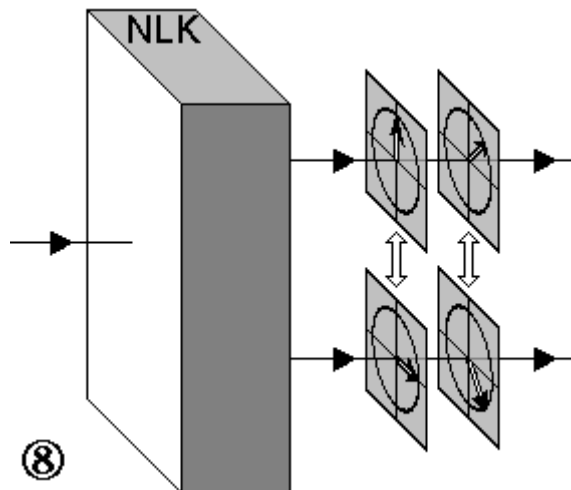
Erst über 50 Jahre später fiel John Stuart Bell auf, dass $\langle A + B \rangle = \langle A \rangle + \langle B \rangle$ überhaupt nicht gelten muss. Es lässt sich sogar ein klassisch mechanisches Modell (mit um verschiedene Achsen rotierenden Kugeln) bauen, in dem $\langle A + B \rangle \neq \langle A \rangle + \langle B \rangle$ ist. Somit hatte von Neumann sein mathematisch zweifellos korrektes Theorem auf unzutreffenden Voraussetzungen aufgebaut, und die Entwicklung von Theorien mit verborgenen Parametern wurde dadurch unnötigerweise über Jahrzehnte ausgebremst. Bereits Albert Einstein (selbst ein Befürworter der verborgenen Parameter) bemerkte, soweit unsere Erkenntnisse sicher sind, bezögen sie sich nicht auf die Natur, und soweit sie sich auf die Natur beziehen, seien sie nicht sicher.

Verschränkung

Wenn man die Arme verschränkt, kann man den einen nicht mehr unabhängig vom anderen bewegen (na ja, im Prinzip). Verschränkung von Quantenobjekten macht sowas Ähnliches. Zur Erzeugung von verschränkten Lichtquanten dient ein „nichtlinearer Kristall“ (NLK), z.B.

Kaliumdihydrogenphosphat KH_2PO_4 . Dieser konvertiert ein energiereiches Lichtquant (z.B. blaues Licht) in zwei energieärmere Lichtquanten (z.B. rotes Licht), wobei die Energieerhaltung natürlich dazu führt, dass die Energien der beiden erzeugten Quanten in der Summe die Energie des ursprünglichen Quants ergeben. Bitte nicht den nichtlinearen Kristall mit dem Kalkspat von weiter oben verwechseln: jener sortiert die Lichtquanten nur, dieser hier erzeugt neue. Die beiden erzeugten Quanten sind dann „verschränkt“. Ihre Eigenschaften sind miteinander gekoppelt, z.B. wenn das eine waagrecht polarisiert ist, ist notwendigerweise das andere senkrecht polarisiert.

Wenn man also an dem einen Quant die Polarisation „senkrecht“ misst (90°), weiß man sofort, dass das andere waagrecht polarisiert sein muss (0°). Und umgekehrt. Das klingt jetzt erst einmal nicht weiter dramatisch; wenn ich versehentlich nur einen Handschuh eingesteckt habe und feststelle, dass es ein linker ist, weiß ich sofort, dass der zuhause gelassene ein rechter sein muss. Der Unterschied ist, dass der Handschuh zuhause die ganze Zeit über ein rechter war, auch bevor ich den linken fand. Dass das bei Lichtquanten anders ist, zeigt sich, wenn man sich entschließt, mit einem schräg unter 45° eingestellten Polarisationsfilter zu messen. Da das andere Lichtquant hierzu senkrecht polarisiert sein muss, erweist es sich jetzt als ebenfalls schräg (135°) polarisiert. Das zweite Lichtquant scheint also stets zu wissen, was an dem ersten gemessen wird und weist die entsprechende Polarisation auf (Bild 8).



Das sieht aus, als ob eine Information (welche Polarisationsrichtung wird am ersten Quant gemessen?) ohne Zeitverzögerung an das zweite Quant übertragen wird. Der Versuch funktioniert auch dann noch, wenn man die beiden Lichtquanten über Glasfaserkabel an zwei verschiedene Enden der Welt leitet und dort erst misst.

Albert Einstein, Boris Podolski und Nathan Rosen führten dies als Argument für die Unvollständigkeit der Quantentheorie an („EPR-Paradoxon“): Da eine zeitverlustfreie Übertragung von Information gemäß der Relativitätstheorie unmöglich ist, müssten die Lichtquanten schon vor der Messung für jede denkbare Stellung der Polarisationsfilter darauf festgelegt sein, unter welcher Polarisationsrichtung sie dann zu erscheinen haben („Wenn senkrecht gemessen wird, werde ich unter 0° und du unter 90° erscheinen. Wenn schräg gemessen wird, werde ich unter 45° und du unter 135° erscheinen.“). Da man unter allen möglichen Winkeln messen kann, müssten die Quanten also eine riesige Tabelle von vorgeschriebenen Reaktionen mit sich führen, wie sie sich jeweils verhalten wollen.

Die einfachere Antwort ist: Die Welt ist tatsächlich nichtlokal. Die beiden Quanten an verschiedenen Orten bilden, solange sie verschränkt sind, immer noch einen *gemeinsamen* Zustand, in dem alle möglichen Polarisationsrichtungen überlagert sind, und bei der Messung kollabiert dieser Zustand zu einem konkreten Messergebnis an *beiden* Quanten. Ein Paradox ist das zunächst nur im Gedankenexperiment. Im tatsächlichen Experiment kann man nur

einmal messen; nach dem Kollaps ist die Verschränkung zerstört, und man kann nicht mehr nachsehen, ob bezüglich einer anderen Polarisation die Richtungen *auch noch* zueinander senkrecht gestanden hätten.

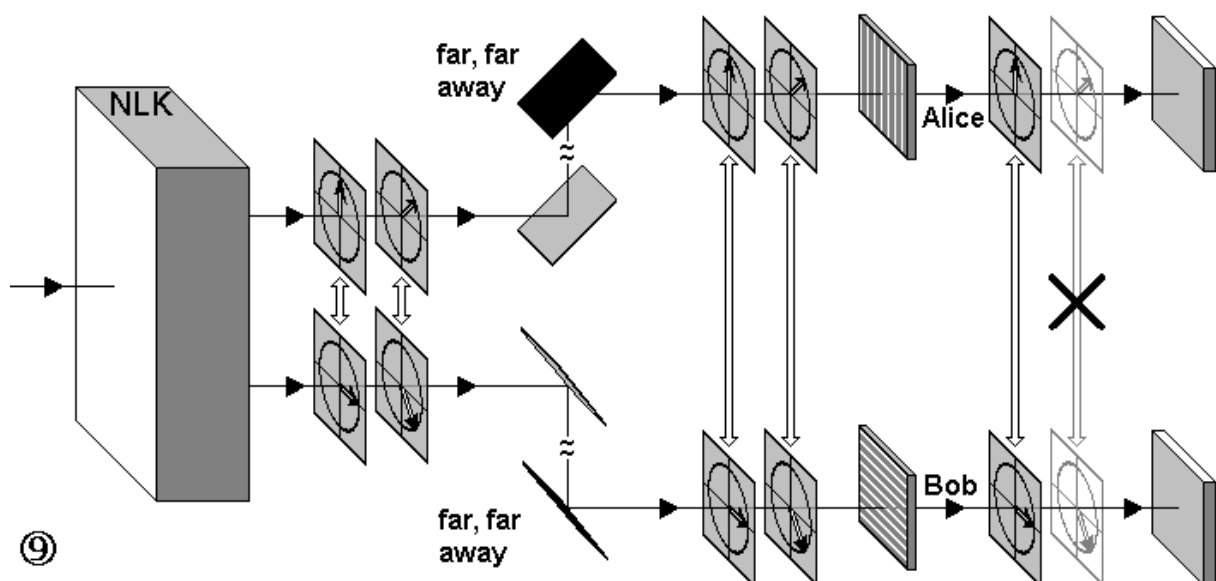
John Stuart Bell zeigte 1964, dass die Nichtlokalität sich, wenn auch nicht im Einzelversuch, so doch im statistischen Mittel über viele Versuche nachweisen lässt. Er nahm zunächst an, dass die Welt lokal sei, die beiden Lichtquanten also tatsächlich ein Tabelle der möglichen Reaktionen mit sich führten und sich daher nachher nicht mehr verständigen müssten. Dann berechnete er eine Korrelationsfunktion zwischen den Ergebnisse vieler Messungen gerader oder schräger Polarisation und zeigte, dass deren Mittelwert zwischen -2 und 2 liegen müsste („Bell’sche Ungleichung“). Im Falle der Nichtlokalität kann er jedoch größer als 2 oder kleiner als -2 werden. Stuart Freedman und John Clauser konnten dies 1972 erstmals nachmessen und die Entscheidung für die Nichtlokalität herbeiführen. Die Korrelation war maximal 2,8 (genauer $2\sqrt{2}$, aber ich hatte ja versprochen, bei Grundrechenarten zu bleiben): Quantenzustände sind stärker korreliert als klassische Zustände.

Der Determinismus würde gegen die Nichtlokalität argumentieren „In diesem Universum ist alles vorherbestimmt, also auch die Messergebnisse“. Das ist auf diese Weise natürlich nicht zu widerlegen. Sorry, ich hatte keine Wahl, ich musste das hier schreiben. Und ihr hattet auch keine Wahl, ihr musstet es wutentbrannt in die Ecke werfen.

Quantenkryptografie

Die Verschränkung kann leider nicht benutzt werden, um zeitverlustfrei Informationen zu übertragen. Zwar kann ein Experimentator sein Polarisationsfilter nach einem bestimmten Schema auf gerade ($0^\circ/90^\circ$) oder schräg ($45^\circ/135^\circ$) einstellen, aber er hat keinen Einfluss darauf, was er (und der entfernte Partner) an einem Lichtquant tatsächlich messen wird.

Hingegen ist es möglich, eine Zufallsfolge von Zahlen an zwei Teilnehmer abhörsicher zu übermitteln, die dann als Schlüssel zum Codieren einer Botschaft verwendet werden kann (Bild 9). Ein Grundsatz der Kryptografie besagt, dass eine chiffrierte Botschaft, deren Schlüssel ebenso lang ist wie die Botschaft, ohne den Schlüssel nicht dechiffriert werden kann. (Selbst wenn ein schneller Computer sämtliche möglichen Schlüssel durchprobieren könnte, würden dadurch nur alle möglichen Zeichenfolgen als dechiffrierter Text erscheinen, von denen etliche vielleicht wie sinnvolle Botschaften aussähen, es aber nicht sind.)



Die beiden Partner (die in der Kryptografie immer Alice und Bob heißen) messen die Polarisation verschränkter Lichtquanten. Alice notiert eine „1“ für senkrecht und eine „0“ für

waagrecht, Bob umgekehrt. Da zu einem senkrecht polarisierten Quant beim einen ein waagrecht polarisiertes beim anderen gehört, haben beide hinterher die gleiche Folge von Nullen und Einsen und können diese nun als gemeinsamen Schlüssel verwenden (Bild 9). Dieses Verfahren ist aber so nicht abhörsicher. Ein Spion (traditionell Eve genannt) könnte die Lichtquanten abfangen, ebenfalls die Polarisation messen, und jeweils ein neues Quant mit der eben gemessenen Polarisationsrichtung weiterschicken. So käme Eve ebenfalls in den Besitz des Schlüssels, ohne dass es auffiele. Deswegen messen Alice und Bob zufällig die gerade oder die schräge Polarisation. Misst Eve bezüglich der falschen Richtung, so nützt ihr das nichts; das von ihr präparierte neue Lichtquant ist mit dem ursprünglichen nicht mehr verschränkt und trägt nicht mehr die Polarisation bezüglich der richtigen Richtung (Das ist auch als das „No-Cloning-Prinzip“ bekannt: einen Quantenzustand kann man nicht kopieren). Der Lauschangriff würde also auffallen, indem Alice und Bob hinterher eine Reihe von Kontrollmessungen vergleichen, die dann nicht mehr zusammenpassen.

Alice und Bob entscheiden sich daher vor jeder Messung zufällig für die Richtung des Filters. Hinterher können sie sich in einer offenen Kommunikation darüber austauschen, in welcher Richtung sie jeweils gemessen haben (aber natürlich nicht über das Messergebnis). Wo immer sie feststellen, dass sie bezüglich verschiedener Orientierungen gemessen haben, streichen sie das Messergebnis. Dann bleiben nur noch die zusammenpassenden Ergebnisse übrig, die nun als Schlüssel verwendet werden.

Viele-Welten-Interpretation

Diese Deutung geht auf Hugh Everett zurück, und ihr liegt die Vorstellung zugrunde, man könne das gesamte Universum als gewaltiges quantenphysikalisches System auffassen. Dann sollte es auch eine Zustandfunktion dieses Systems geben, also des gesamten Universums inklusive aller Beobachter. Dann ist aber nichts mehr übrig, das noch eine Messung vornehmen und so einen Kollaps der Zustandfunktion auslösen könnte. Das Problem, wie der Kollaps mit der Quantenphysik vereinbar ist, verschwindet dadurch: es gibt keinen mehr. Natürlich ist eine Zustandfunktion des Universums eine gewagte Extrapolation, da die Quantenphysik nur für Mikroobjekte entwickelt und an ihnen getestet ist.

Aus dem weiter oben betrachteten Zustand

$$|v\rangle = 0,8 \cdot |w\rangle + 0,6 \cdot |s\rangle,$$

polarisierten Lichtes (ohne Beobachter) wird, wenn der Beobachter ($O = \text{Observer}$) von der Zustandfunktion mit erfasst wird, ein Zustand

$$|v\rangle = 0,8 \cdot |w, O_w\rangle + 0,6 \cdot |s, O_s\rangle.$$

O_w ist ein Beobachter, der waagrecht polarisiertes Licht feststellt, O_s einer, der senkrecht polarisiertes Licht sieht. Der Beobachter befindet sich jetzt ebenfalls in einem Überlagerungszustand der möglichen Ergebnisse. Die Erfahrung besagt aber, dass man bei dem Experiment ein konkretes Ergebnis sieht. Das muss jetzt erklärt werden, ohne dass ein Kollaps der Zustandfunktion eintritt.

Die Viele-Welten-Interpretation nimmt an, dass sich bei jeder Beobachtung die Welt in zwei Zweige aufspaltet, in deren einem sich O_w befindet und $|w\rangle$ misst, in dem anderen befindet sich O_s und misst $|s\rangle$. Squires meint an dieser Stelle, an der Welt ändere sich dadurch eigentlich gar nichts, nur die Anzahl der möglichen Ansichten der Welt vergrößere sich. Unsere Erfahrung wäre demnach nur ein Teilaspekt der gesamten Welt: ein weiterer Meilenstein auf dem Weg der fortwährenden Degradierung des Menschen durch die Wissenschaft. Erst waren wir nicht mehr Mittelpunkt des Universums (Kopernikus), dann waren wir nicht mehr Krone der Schöpfung (Darwin), dann nicht mehr Herr unserer Psyche (Freud) – und nun nicht einmal mehr unsere ganze Zustandfunktion. Und die Zahl der

Aufspaltungen der Welt muss seit ihrem Anbeginn gewaltig sein, inzwischen kann der uns bekannte Teil nur noch ein winziger Bruchteil sein, möglicherweise mit irrsinnig kleiner Wahrscheinlichkeit, während andere Ansichten vielleicht einen völlig unbewohnbaren Kosmos darstellen. Allerdings drängt sich nun die Frage auf, welche Bedeutung die Faktoren (im Beispiel 0,8 und 0,6), deren Quadrate (0,64 und 0,36) ja die Wahrscheinlichkeiten für den Kollaps in den Zustand $|w\rangle$ bzw. $|s\rangle$ darstellen, jetzt überhaupt noch haben, wenn doch beide Zustände tatsächlich realisiert werden und nicht nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit. Ein im Grunde schon als verzweifelt zu betrachtender Ausweg ist die Annahme, dass die Welt dann eben in 64 Ansichten $|w\rangle$ bzw. 36 Ansichten $|s\rangle$ aufspaltet – oder, falls das Universum weiß, wie man Brüche kürzt, in 16 Ansichten $|w\rangle$ und 9 Ansichten $|s\rangle$. Und was macht man, wenn die Faktoren irrationale Zahlen sind? Und was bedeutet eigentlich „Ansichten“? Wenn da jemand ist, der die Welt ansieht, dann steht er doch wieder außerhalb der Welt, was dieser Ansatz ja gerade vermeiden wollte. Fortsetzung folgt.